中国生态农业学报 2016 年 2 月 第 24 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2016, 24(2): 183−191

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150885

枣麦间作系统中冬小麦的冠层光分布特征及产量研究*

郭佳欢 潘存德** 冯会丽 王世伟 李 星

(新疆农业大学林学与园艺学院 乌鲁木齐 830052)

摘 要 针对近年来"林农生产争地争光"的问题，以株行距为 3 m×4 m 南北行向栽植的枣树||冬小麦间作系统为研究对象，大田条件下设置枣麦间作(JZ)和冬小麦单作对照(CK)两个处理，以 2013—2014 年生长季冬小麦光合生理参数和冠层光照强度为基础，以两棵枣树的定植点连成 1 条测定样线，在样线上以距枣树的东(E)、西(W)距离为基准，每 50 cm 设置 1 个测定点，设 E50 cm、E100 cm、E150 cm、E200 cm(W200 cm)、W150 cm、W100 cm、W50 cm 共 7 个测定位置，在不同调查时期测定各测定位置的冬小麦冠层光合有效辐射(PAR)，并在冬小麦成熟期调查各测定位置上的产量。采用多项式回归和定区间积分等方法计算冬小麦分蘖期、拔节期、抽穗期、扬花期、灌浆期和成熟期冠层达到饱和 PAR 的时长与时空窗，探讨枣麦间作系统中枣树遮光对间作作物冬小麦冠层光照分布及产量的影响。结果显示，间作系统中冬小麦冠层光照强度及产量整体呈现出不同的时空分布特征，且相较于单作小麦系统均有一定程度的衰减。单作冬小麦冠层的饱和 PAR 时空窗比间作处理大 56.1%，穗粒数、有效穗数、千粒重和产量分别比间作小麦高 14.7%、15.9%、33.5%和 53.0%。相对于单作对照，间作物冬小麦整个生育时期内在距枣树 E50~E100 cm、E100~E150 cm、E150~E200 cm、W150~W200 cm、W100~W150 cm、W50~W100 cm 处的冠层 PAR 时空窗损失严重，分别达 92.5%、45.7%、7.0%、5.4%、10.9%、54.0%。冠层 PAR 时空窗损失导致冬小麦减产，在以上各处减产程度分别达 46.2%、39.6%、26.3%、24.7%、32.4%和 37.6%。故枣树遮阴程度的差异导致间作物冬小麦不同程度减产，且间作巷道内西侧光照质量整体优于东侧。这就要求在冬小麦扬花期后对枣树进行适当修剪，且适当增加巷道东侧枣树株距，以避免枣树新生枝徒长，提高冬小麦冠层光合有效辐射截获量，使间作系统获得更高产量。

关键词 枣麦间作 冬小麦 冠层 光合有效辐射 时空窗 产量
中图分类号: Q948; S344.2; S512.1^{+1}; S665.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)02-0183-09

Canopy light distribution and yield of winter wheat in jujube-wheat strip intercropping system*

GUO Jiahuan, PAN Cunde**, FENG Huili, WANG Shiwei, LI Xing

(College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract Aiming at competition for land and light between forestry and agriculture, a jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) strip intercropping system in north-south direction with 3 m × 4 m plant and row spacing was used to study light distribution of winter wheat canopy. In the field, two treatments of jujube and winter wheat intercropping (JZ) and monocrop of winter wheat (CK) were investigated during the 2013–2014 growing season. In winter wheat trip, measurement points were set at every 50 cm distance between two jujube trees (reference spacing). Thus seven measurement points were subsequently set as E50 cm, E100 cm and E150 cm, E200 cm (W200 cm) and W150 cm, W100 cm and W50 cm (E and W meant the eastern and western parts of winter wheat trip). In the monocultured winter wheat system, the same

* 中央财政林业科技推广示范资金项目[xjlk(2013)009 号]资助
** 通讯作者: 潘存德，主要研究方向为森林生态与经营。E-mail: pancunde@163.com
郭佳欢，主要研究方向为植物生态学。E-mail: 595789391@qq.com
收稿日期: 2015−08−06 接受日期: 2015−11−12

* The study was supported by the Central Government Forestry Science and Technology Popularizing Demonstration Projects [No. xjlk(2013)009].
** Corresponding author, E-mail: pancunde@163.com
Received Aug. 6, 2015; accepted Nov. 12, 2015

measurement pointes were set also. During different growth stages of winter wheat (tillering, jointing, heading, flowering, filling and mature stages), the photosynthetically active radiation (PAR) of winter wheat canopy in different positions was measured. At maturity, the yield of winter wheat was also investigated. The spatial windows of canopy saturated PAR of winter wheat at different growth stages were analyzed using polynomial regression and fixed interval integral so as to determine light distribution of winter wheat canopy in jujube-wheat strip intercropping system. The results showed that under strip intercropping system, canopy light intensity and yield of winter wheat had different spatial and temporal distribution characteristics. There was a certain degree of attenuation compared to winter wheat monocrop system. The space-time windows of canopy saturated PAR, grain number per spike, effective panicle number, 1000-grain weight, yield under monocrop of winter wheat (the control) were respectively 56.1%, 14.7%, 15.9%, 33.5% and 53.0% higher than those under intercropping system. Compared with monocultured winter wheat (control) the space-time windows of canopy saturated PAR of intercropped winter wheat system at E50–E100 cm, E100–E150 cm and E150–E200 cm, and W150–W200 cm, W100–W150 cm and W50–W100 cm suffered serious losses of 92.5%, 45.7% and 7.0%, and 5.4%, 10.9% and 54.0%, respectively. The losses of space-time windows of canopy saturated PAR resulted in a decrease in winter wheat yield, respectively, by 46.2%, 39.6% and 26.3%, 24.7%, 32.4% and 37.6%. The results of the study suggested that the differences in the degree of shading of jujube plants were the causes of the differences in yield reductions of winter wheat. The lighting quality in the west side of winter wheat strip in intercropping system was better than that in the east side during the whole growth period. As a result, jujube could be properly trimmed after winter wheat flowering and the east spacing appropriately increased, not only to control the over growth of new jujube branches, but also to improve winter wheat canopy PAR interception. This could ensure high yield of winter wheat under intercropping system of jujube and winter wheat.
Keywords Jujube-wheat intercrop; Winter wheat; Canopy; Photosynthetically active radiation; Space-time window; Yield

在传统农业以及现代农业生产中，世界上许多地区常采用果农间作的复合生产模式来提高土地利用率，调和林农用地竞争的矛盾[1−2]。在中国，间作生产模式由来已久，它在国内农业生产上的地位举足轻重[3]，特别是在新疆以林果生产为主要产业的地区，早已形成了特有的果农复合生产模式。已有研究表明，新疆自治区南疆地区林果种植面积达 56.67×10^4 hm^2，其中果农间作面积达 80%以上，且很大一部分采取枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)麦(*Triticum aestivum* L.)间作复合生产[4]。枣麦间作复合生态系统既是一种典型的生态型立体农业，也是平原绿化体系中的重要组成部分，尤其在新疆这种以盐碱、干旱和贫瘠土壤条件为主的区域生态环境中，对地表水分的涵养、防尘固沙和改善区域小气候等具有十分重要的生态意义。它在作物生产可持续发展的基础上，不仅可提供最优化的资源(土地、光、温度)利用，还可给农民带来更高的经济收益[5]。间作系统中，植物间存在协同作用的同时，竞争形式多样，不仅有对水肥的竞争[6]，对光的争夺也十分显著[7]。光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)是生态系统中能量获取的主要来源，光照不足不但影响植物的生长发育和形态建设，而且造成作物光合能力下降，产量减少[8]。因此，间作系统的整体生产能力很大程度上取决于地上部分对光的竞争能力[9]，调节系统内光竞争机制、优化光资源分配是间作系统可持续发展的关键[10]。目前国内外对于农林间作系统作了大量的研究，有研究表明，冬小麦产量的 90%~95%来源于光合作用[11−12]，花后遮阴会导致冬小麦明显减产[13]。还有研究证实枣麦间作系统中光分布直接影响间作作物光合速率，进而影响间作物产量[14]。目前关于枣粮间作生态系统的探究还主要集中在系统结构、土壤养分、种间关系、生态影响和经济效益上[15−20]，对间作系统中光照分布的探索也仅限于反映作物的某一特定生长时期或不同生育时期的某一时间点的光照分布情况。而关于从时间上和空间上表现出枣麦间作巷道某一空间方位任意时间点上的光照分布情况以及光照分布与产量之间的关系的研究尚少见报道。本试验运用光合有效辐射时空窗度量的方法，对枣麦间作系统中冬小麦不同生育时期冠层饱和光合有效辐射时空窗展开研究，旨在能掌握枣麦间作系统中冬小麦冠层光照的时空动态变化规律及实时分布情况，了解枣麦间作系统中冬小麦的冠层光照与产量之间的关系，为改善间作系统内的光竞争机制、提高间作系统产量提供科学依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于新疆维吾尔自治区喀什地区岳普湖县也克先拜巴扎乡，76°23′13.8″E，38°48′18.5″N，海拔 1 250 m。属暖温带大陆性干旱气候，气候干燥，四季分明，降水量少，日照时间长。年降水量 51.7 mm,

多年平均蒸发量 2 651 mm，年均温度 11.7 ℃，1 月平均气温–6 ℃，7 月平均气温 27 ℃，无霜期 213 d，≥10 ℃的年有效积温 4 354 ℃。风沙浮尘天气较多，主要集中在春夏两季。现有耕地 12 947.7 hm^2，其中 22.3%用于枣麦间作。土壤质地较轻，以沙土、沙壤土为主，土壤通透性良好。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验地不同土层土壤基本化学性质

Table 1 Some basic chemical properties of different soil layers in the experiment field

土层 Soil layer (cm)	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($g\cdot kg^{-1}$)	全磷 Total phosphorus ($g\cdot kg^{-1}$)	全钾 Total potassium ($g\cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Available nitrogen ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($mg\cdot kg^{-1}$)
0~20	26.48±1.22Aa	0.97±0.06Aa	0.86±0.06Aa	11.15±0.03Aa	57.9±4.5Aa	17.5±0.3Aa	204.6±3.2Aa
20~40	20.05±1.44Bb	0.64±0.04Bb	0.55±0.04Bb	9.56±0.05Bb	26.1±3.3Bb	11.2±0.3Bb	176.3±3.7Bb
40~60	14.22±0.55Cc	0.35±0.03Cc	0.30±0.02Cc	5.07±0.03Cc	18.6±1.1Bc	9.3±0.3Cc	120.5±0.9Cc

表中数值为平均值±标准差，同列不同大小写字母表示在 0.01 和 0.05 水平上差异显著，下同。Values are means±SD. Different capital and small letters in a column indicate significant different at 0.01 or 0.05 levels. The same below.

1.2 试验设计

供试对象为枣麦间作复合生产系统。枣树品种为树势中强、产量高而稳定的灰枣(*Ziziphus jujuba* Mill. ‘Huizao’)，树龄 6 a，平均株高 3.66 m，基径 5.70 cm，东西冠幅 2.39 m，南北冠幅 2.79 m，株行距 3 m×4 m，南北行向栽植。冬小麦品种为当地主栽品种‘新冬 20 号’，机条播，播种行距 15 cm，两行枣树之间间作 20 行。播种日期为 9 月下旬，播种量为 430 $kg\cdot hm^{-2}$，有效株数 6.9×10^6 株$\cdot hm^{-2}$，生育期 238 d 左右。试验于 2013 年 10 月至 2014 年 6 月进行，枣麦相距 50 cm 间作，共生期内共灌水 4 次，3 月 25 日浇头水、4 月 12 日浇二水、4 月 25 日浇三水、5 月 20 日浇末水。试验小区面积 3 m×4 m，设 9 次重复。试验采用双因素裂区设计，随机选取树势(冠幅、树高、基径)一致的一对(2 株)枣树，以两棵枣树的定植点连成 1 条测定样线，3 条测定样线为 1 个试验组，共设 3 组重复；在样线上，以距枣树定植点的距离为基准，每 50 cm 设置 1 个测定点。以调查时期为主处理，设分蘖期(3 月中旬)、拔节期(4 月中旬)、抽穗期(5 月上旬)、扬花期(5 月中旬)、灌浆期(5 月下旬)和成熟期(6 月中旬)共 6 个水平；以测定位置为副区，设 E50 cm、E100 cm、E150 cm、E200 cm(W200 cm)、W150 cm、W100 cm、W50 cm 共 7 个水平(E 和 W 分别表示小麦带的东侧与西侧)，在不同的调查时期内测定各测定位置上的冬小麦冠层 PAR，并在冬小麦成熟期调查各测定位置上的产量。其中，单作冬小麦的栽培方式、调查时期及调查位置与间作系统相同，单作田中对应的枣树栽植区域设为间隔空地，试验期间枣树与冬小麦均按当地高产田管理方法进行施肥及灌溉管理。

1.3 数据采集

1.3.1 冬小麦光合生理数据采集

采用美国 Li-COR 公司生产的便携式光合仪 Li-6400XT 及其本身配备的 LED 人工光源测定冬小麦的光合生理参数。分别在冬小麦各调查时期内选取管理良好的冬小麦单作生产田中无病虫害症状冬小麦旗叶进行现场测定。于晴朗无云的上午 10:00—12:00 测定冬小麦旗叶在光合光量子通量密度(photosynthetic photo flux density, PPFD)15 个梯度下的净光合速率 P_n(net photosynthetic rates)，并绘制出 P_n-PPFD 曲线。测定时叶片温度、叶室内部 CO_2 浓度、空气相对湿度分别维持在(32±1) ℃、80%±1%和 400 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$。每次测定选择 5 片叶作为重复，取平均值。

1.3.2 冬小麦冠层 PAR 数据采集

采用美国 Li-COR 公司生产的线状量子传感器 LI-191 测定冬小麦冠层 PAR。自 3 月份起，在小麦各调查时期，于晴朗无云时，采用往返观测法，自 8:00 至 20:00 测定各样点上冬小麦的冠层 PAR 值，每小时测定 1 次，同一时间测定单作冬小麦冠层 PAR，设为试验对照(CK)。

1.3.3 间作系统中枣树测树因子的数据采集

采用围尺、皮尺、测高器测定样地内枣树的测树因子(基径、冠幅、树高)。测量日期与 PAR 值的测定日期相同，每个时期测量 1 次，每次设 18 株重复，取平均值。

1.3.4 冬小麦产量的数据采集

采用产量因素测产法[21–22]测定间作系统及单作试验田中冬小麦的产量。于冬小麦成熟期，以 0.5 m^2 为 1 个测产单元，在各调查位置上收取冬小麦，取样长 0.5 m，宽 1 m。同时，按此方法在小麦单作试验田中与间作系统相对应的调查位置上收取冬小麦。小麦收取后，调查每个测产单元内穗粒数为 5 以上的冬小麦穗数，并从中随机抽取 20 株脱粒后调查穗粒数、千粒重及产量。间作系统与小麦单作试验田各设 3 个试验重复，取平均值。

1.4 数据处理

1.4.1 冬小麦光合生理参数处理

冬小麦光合作用对光响应模型(光响应曲线)采用目前常用的非直角双曲线模型[23–24]。该模型方程为:

$$P_n(I)=\frac{\alpha I+P_{max}-\sqrt{(\alpha I+P_{max})^2-4\alpha\theta IP_{max}}}{2\theta}-R_d \quad (1)$$

式中: P_n 为净光合速率(μmol·m^{-2}·s^{-1}), I 为冬小麦叶片接受到的 PPFD[mol(CO_2)·μmol^{-1}], P_{max} 为冬小麦的最大净光合速率(μmol·m^{-2}·s^{-1}), R_d 为暗呼吸速率, θ 为非直角曲线的凸度, α为表观量子效率[μmol (CO_2)·μmol^{-1}(PPFD)]。冬小麦的光补偿点(light compensation point, LCP)可以通过冬小麦的光响应曲线得到[23]。但由于非直角双曲线模型本身具有不收敛性, 通过该模型无法计算出冬小麦的饱和光照强度, 只有通过对冬小麦不同时期在光照强度小于或等于 200 μmol·m^{-2}·s^{-1} 时的净光合速率和光强进行线性回归, 得到表观量子效率(apparent quantum efficiency, AQE), 然后通过解方程 P_{max}=AQE×LSP–R_d 可以得到冬小麦各调查时期的光饱和点(light saturation point, LSP)。

1.4.2 PAR 时空窗的度量

以间作巷道内每条样线上间作作物冠层各测点一天内(8:00—20:00)接受到的最大光量子密度 PPFD 为因变量, 以测量时间 t 为自变量建立数学关系式: PPFD=at^2+bt+c, 得到冬小麦不同生育时期 PPED 与 t 的一元二次方程[25], 将冬小麦不同生育时期的 LSP 值代入各方程 PPFD 中后解方程, 便可以得到各时期时冬小麦冠层 PAR 达到 LSP 值或 LSP 值以上的起止时间 t_1 和 t_2, 且 $t_2 \geq t_1$。

以间作巷道内每条样线中各个采集点实时采集的 PAR 值绘制出该条样线上的 PAR 分布图, 在图中以 6 min 为时间长度量取该时刻冬小麦冠层各数据采集点接受到的 PAR 达到 LSP 值及以上的空间长度 l。然后以空间宽度 l 为因变量, 以时间 t 为自变量建立 $l=f(t)$的数学关系, 然后通过一元七次多项式回归得到方程组。

往方程 $l=f(t)$中代入任意时间 $t(t_1<t<t_2)$便可得到 t 时刻该被测样线上冬小麦冠层接受到的 PAR 达到饱和光强或饱和光强以上的空间宽度 l。分别对每个方程进行指定区间积分 $\int_{t_1}^{t_2} f(t)dt$ 可得到任意时间段内间作巷道中接受到的 PPFD 达到光饱和点以上的时空窗(m·h)。积分取值区间为 $L_{min}(t_2-t_1) \leq \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt \leq L_{max}(t_2-t_1)$, L_{min}、L_{max} 分别表示某一时期冬小麦冠层接收到的 PAR 达到饱和光强或饱和光强以上的空间最小宽度和最大宽度。

1.5 数据分析与作图

采用 Microsoft Excel 2007、ORIGIN PRO 9.0 进行数据的统计, 采用 SPSS 18.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 冬小麦不同生育时期光合生理参数

在不同生育时期, 冬小麦对光合有效辐射的利用能力不同, 但对 PPFD 的响应趋势表现一致。从图 1 可看出, 当 PPFD≤200 μmol·m^{-2}·s^{-1} 时, 冬小麦的净光合速率 P_n 上升趋势明显, 几乎呈直线上升, 此后缓慢上升, 至 1 400 μmol·m^{-2}·s^{-1} 处接近顶点达到饱和平衡后不再上升, 甚至略微下降。从表 2 可以看出, 冬小麦不同生育时期的光饱和点存在极显著性差异(P<0.01)。灌浆期的光饱和点最大, 为 1 428.16 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 极显著大于其他时期(P<0.01); 扬花期和抽穗期的光饱和点无显著性差异, 但二者与其他时期的光饱和点均差异极显著(P<0.01); 拔节期的光饱和点与其他时期的光饱和点均存在极显著性差异(P<0.01); 分蘖期和成熟期的光饱和点无显著性差异, 二者皆极显著小于其他时期的光饱和点(P<0.01)。这表明, 冬小麦的生理结构随着生育时期不断调整, 其光合能力随着生理结构的改变而改变, 在分蘖期对光照的利用能力不断提升, 灌浆期对光照的利用能力达到最大, 然后逐渐下降。

冬小麦成熟期的光补偿点最大为 86.07 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 与分蘖期的光补偿点无显著差异, 极显著大于其他 4 个时期的光补偿点(P<0.01); 分蘖期的光补偿点显著大于拔节期的光补偿点(P<0.05), 极显著大于

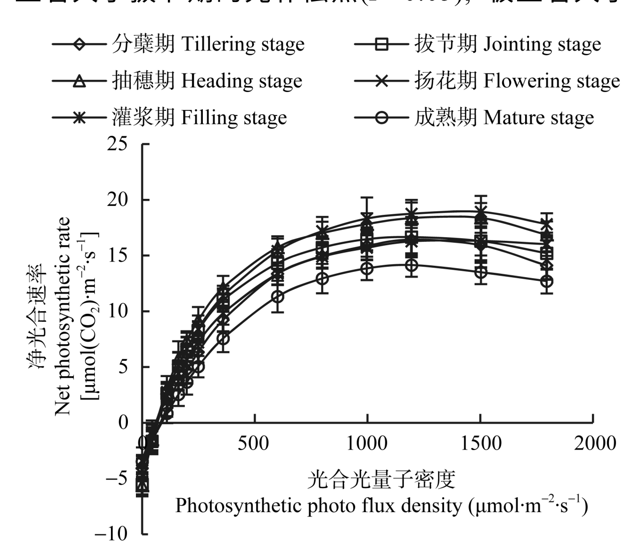


图 1 枣麦间作系统中冬小麦不同生育时期的光响应曲线

Fig. 1 Light response curves of winter wheat at different growth stages in jujube-wheat intercropping system

表 2　枣麦间作系统中冬小麦不同生育时期的光合生理特征参数

Table 2　Photosynthetic physiology characteristic parameters of winter wheat at different growth stages in jujube-wheat intercropping system

生育时期 Growth stage	光饱和点 Light saturation point (μmol·m^{-2}·s^{-1})	光补偿点 Light compensation point (μmol·m^{-2}·s^{-1})
分蘖期 Tillering stage	1 197.95±15.29Dd	79.80±6.01ABa
拔节期 Jointing stage	1 249.72±19.97Cc	67.02±4.75BCb
抽穗期 Heading stage	1 356.76±22.25Bb	63.67±5.85Cb
扬花期 Flowering stage	1 366.39±24.71Bb	59.32±3.13Cb
灌浆期 Filling stage	1 428.16±16.57Aa	60.67±6.06Cb
成熟期 Mature stage	1 171.33±9.72Dd	86.07±7.05Aa

抽穗期、扬花期和灌浆期的光补偿点(P<0.01)；拔节期、抽穗期、灌浆期和扬花期的光补偿点均无显著性差异。这意味着冬小麦对光照的利用下限在 60 μmol·m^{-2}·s^{-1}左右，利用上限在 1 400 μmol·m^{-2}·s^{-1}左右，低于下限或超过上限后冬小麦便无法进行正常的光合作用。冬小麦在扬花期对弱光(≤200 μmol·m^{-2}·s^{-1})利用能力最强，灌浆期略次之，即扬花期和灌浆期光合作用与呼吸作用达到动态平衡时对光需求最小，对弱光的适应性最好。

2.2　枣麦间作系统 PAR 的空间分布特征

间作巷道内冬小麦不同调查时期内的冠层 PAR 分布趋势大致相同，整体呈现出“中间高，两侧低”、“西侧高，东侧低”和“下午高，上午低”的时空分布趋势。在冬小麦各调查时期内，冠层 PAR 值表现为灌浆期>扬花期>抽穗期>成熟期>拔节期>分蘖期。时间上，在 14:00—16:00 时冬小麦冠层 PAR 值最高，空间上，在 E50 cm、M200 cm 和 W150 cm 处 PAR 值最高。这表明，枣麦间作系统中光照时空分布不均，夏季光照强于春季，下午的光照要优于上午；西侧的光照整体优于东侧，中部光照整体优于两侧(图 2)。

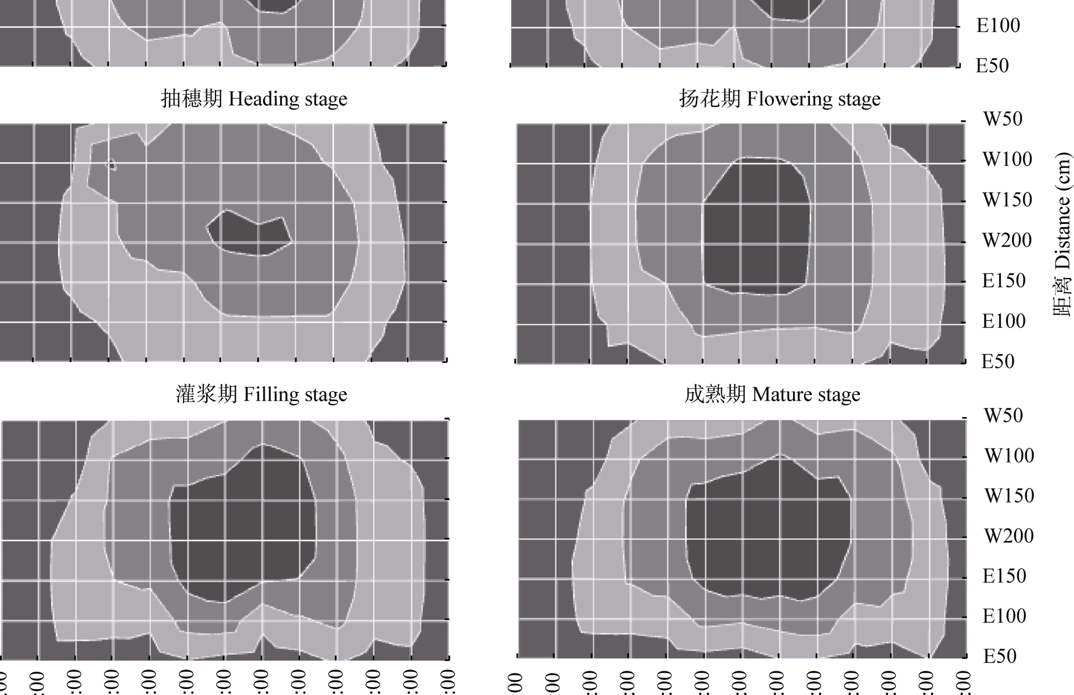


图 2　枣麦间作系统中冬小麦不同生育时期的冠层光合有效辐射(PAR)空间分布

Fig. 2　Canopy photosynthetically active radiation (PAR) spatial distribution of winter wheat at different growth stages in jujube-wheat intercropping system

E 和 W 分别表示小麦带的东侧与西侧，其后的数据为距枣树的距离，下同。E and W mean the eastern and western parts of winter wheat belt, data following them are distance from jujube tree. The same below.

2.3 枣麦间作系统中冬小麦的饱和 PAR 时空窗

2.3.1 PAR 时空窗的时间变化

在枣麦间作系统中，冬小麦不同生育时期枣树对其遮阴程度不同。不同生育时期内，间作作物冬小麦冠层 PAR 达 LSP 及以上的时长存在极显著差异(P<0.01)。成熟期最长(6.8 h)，极显著大于其他时期(P<0.01)；扬花期最短(3.6 h)，极显著小于其他时期(P<0.01)。相对于单作对照(CK)，间作冬小麦在扬花期和灌浆期冠层 PAR 达 LSP 及以上的时长缩减程度最大，均减少 0.7 h，分别达 CK 的 16.3%、13.7%；抽穗期时为 4.2 h，相对 CK 减少 0%。说明枣树树冠的遮阴直接影响间作冬小麦冠层接受到饱和光强及饱和光强以上的起止时间，进而影响冬小麦的有效光合作用时长。以达到光饱和的时长为衡量标准，此结果表明在冬小麦扬花期时，枣树的遮阴对间作巷道内的光照强度影响最大，灌浆期次之，在抽穗期几乎不产生影响(表 3)。

表 3 间作冬小麦不同生育时期光合有效辐射达到光饱和点(LSP)以上的时间

Table 3 Time to and above light saturation point (LSP) for photosynthetically active radiation at different growth stages winter wheat in jujube-wheat intercropping system h

处理 Treatment	时间 Time	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	扬花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage
JZ	t_1	11.4±0.1CDe	11.6±0.1Cd	12.5±0.1Ab	12.7±0.1Aa	12.2±0.0Bc	11.3±0.0De
	t_2	17.5±0.0Bb	17.4±0.1Bb	16.7±0.0Cc	16.3±0.1Dd	16.6±0.2Cc	18.1±0.2Aa
CK	t_1	11.2±0.0CDd	11.4±0.1Cc	12.4±0.1Aa	12.4±0.0Aa	11.9±0.1Bb	11.1±0.1De
	t_2	17.4±0.1Bb	17.3±0.1Bb	16.6±0.1Dd	16.7±0.1Dd	17.0±0.1Cc	18.0±0.1Aa

JZ、CK 分别表示枣麦间作、冬小麦单作生产系统；t_1、t_2 分别表示光合有效辐射高于间作物光饱和点的开始和结束时间。JZ, CK represent jujube-wheat intercropping, winter wheat monoculture systems, respectively; t_1, t_2 mean the start and end times of photosynthetically active radiation to above light saturation point.

2.3.2 PAR 时空窗的空间变化

间作系统中，冬小麦同一生育时期，同一样线上各样点上的光强也不同。通过定积分后可看出，空间上，冬小麦冠层饱和光照呈“n”型曲线分布，同一条样线上不同空间方位上饱和 PAR 时空窗存极显著差异(P<0.01)，在 E50~E100 cm 处达最低值，极显著小于其他处(P<0.01)；在 W150~W200 cm 处极显著大于其他处(P<0.05)，达最大值；巷道西侧各点上饱和 PAR 时空窗显著大于巷道东侧(P<0.01)，表明巷道内光照空间分布不均，西侧光照环境优于东侧。

时间上，冬小麦不同生育时期冠层饱和 PAR 时空窗差异显著。分蘖期显著大于其他时期(P<0.01)，相对 CK 损失仅占 18.8%；扬花期显著小于其他时期(P<0.01)，相对 CK 损失达 54.0%；拔节期与成熟期无显著性差异，相对损失为 22.5%、35.3%。这表明分蘖期时的光环境最佳，此时树体遮阴对冬小麦的生长及生物产量的形成影响不大；扬花期遮阴最严重，此时光照条件最差，不利于冬小麦生长(表 4)。

表 4 枣粮间作系统中冬小麦不同空间方位和不同生育时期饱和光合有效辐射时空窗

Table 4 Time and distance (space-time window) of photosynthetically active radiation to above light saturation point at different spatial positions of winter wheat belt and at different growth stages of winter wheat in jujube-wheat intercropping system m·h

位置 Space position (cm)	处理 Control	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	扬花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Mature stage	合计 Sum
E50~E100	JZ	0.64±0.12Cd	0.46±0.17Dd	0.00±0.00De	0.00±0.00Ce	0.00±0.00Ee	0.11±0.01Dd	1.21±0.30Gg
	CK	3.00±0.15Aa	2.90±0.17Aa	2.05±0.16Aa	2.10±0.07Aa	2.50±0.11Aa	3.45±0.17Aa	16.00±0.83Bb
E100~E150	JZ	2.40±0.09Bc	2.11±0.20Cc	0.82±0.00Bc	0.49±0.12Bc	0.64±0.05Cc	2.22±0.13Bb	8.69±0.59Ee
	CK	3.00±0.15Aa	2.90±0.17Aa	2.05±0.16Aa	2.10±0.07Aa	2.50±0.11Aa	3.45±0.17Aa	16.00±0.83Bb
E150~E200	JZ	2.98±0.10Aa	2.83±0.00Aa	2.03±0.12Aa	1.72±0.20Aa	2.04±0.09Aa	3.28±0.25Aa	14.88±0.76Cc
	CK	3.00±0.15Aa	2.90±0.17Aa	2.05±0.16Aa	2.10±0.07Aa	2.50±0.11Aa	3.45±0.17Aa	16.00±0.83Bb
W150~W200	JZ	3.00±0.10Aa	2.85±0.05Aa	2.05±0.03Aa	1.75±0.09Aa	2.14±0.11Aa	3.35±0.07Aa	15.14±0.45Bb
	CK	3.00±0.15Aa	2.90±0.17Aa	2.05±0.16Aa	2.10±0.07Aa	2.50±0.11Aa	3.45±0.17Aa	16.00±0.83Bb
W100~W150	JZ	3.00±0.08Aa	2.83±0.15Aa	1.85±0.10Ab	1.53±0.06Ab	1.76±0.25Bb	3.29±0.21Aa	14.26±0.85Dd
	CK	3.00±0.15Aa	2.90±0.17Aa	2.05±0.16Ab	2.10±0.07Aa	2.50±0.11Aa	3.45±0.17Aa	16.00±0.83Bb
W50~W100	JZ	2.58±0.11Bb	2.42±0.21Bb	0.55±0.02Cd	0.30±0.02Bd	0.36±0.10Dd	1.14±0.25Cc	7.36±0.71Ff
	CK	3.00±0.15Aa	2.90±0.17Aa	2.05±0.16Aa	2.10±0.07Aa	2.50±0.11Aa	3.45±0.17Aa	16.00±0.83Bb
合计 Sum	JZ	14.61±1.41Bb	13.48±0.78Cc	7.30±0.27Dd	5.80±0.49Ff	6.94±0.60Ee	13.39±0.92Cc	61.52±3.66Aa
	CK	18.00±0.90Cc	17.40±1.02Dd	12.30±0.96Gg	12.60±0.42Ff	15.00±0.66Ee	20.70±1.02Bb	96.00±4.98Aa

2.3.3　间作遮阴对冬小麦产量的影响

冬小麦成熟后考种数据和实收产量表明，枣树遮阴使得间作物冬小麦的穗粒数、有效穗数、千粒重和产量显著降低。单作对照处理的穗粒数、有效穗数、千粒重和产量分别比间作处理高 14.7%、15.9%、33.5%和 53.0%。间作系统中，不同空间方位上的冬小麦穗粒数和有效穗数存在显著性差异，W150~W200 cm 处的穗粒数($P<0.01$)和有效穗数($P<0.05$)显著高于其他各处；千粒重和产量不同空间方位并无显著性差异，但冬小麦减产程度差异明显，E50~E100 cm、E100~E150 cm、E150~E200 cm、W150 ~W200 cm、W100~W150 cm 和 W50~W100 cm 处减产程度分别达 46.2%、39.6%、26.3%、24.7%、32.4%和 37.6%。这说明冬小麦冠层遮阴时长和遮阴强度的差异造成冬小麦光合作用有机物积累的差异，进而造成减产程度的差异；光合有效辐射减少影响了冬小麦穗部正常生长，导致其有效穗数和穗粒数减少，从而导致产量降低(表 5)。

表 5　枣粮间作系统中不同空间方位冬小麦产量及其构成因素
Table 5　Yield and its components of winter wheat at different spatial positions of winter wheat belt in jujube-wheat intercropping system

位置 Space position (cm)	穗粒数 Grains per spike		有效穗数 Spike number		千粒重 Grain weight (g)		产量 Yield (g·20 plants^{-1})	
	JZ	CK	JZ	CK	JZ	CK	JZ	CK
E50~E100	724±12Bb	874±19Aa	309±7Bc	382±9Aa	25.76±2.37Aa	39.69±3.65Aa	18.65±3.16Aa	34.69±6.14Aa
E100~E150	729±15ABb	873±16Aa	317±9Bbc	376±6ABab	28.61±4.50Aa	39.53±5.33Aa	20.86±4.34Aa	34.51±4.89Aa
E150~E200	750±13ABab	847±16Aab	329±8ABab	373±5ABabc	31.87±3.12Aa	38.30±6.02Aa	23.90±5.37Aa	32.44±5.33Aa
W150~W200	766±17Aa	830±11ABbc	337±5Aa	368±6ABbc	31.77±5.11Aa	38.94±4.23Aa	24.33±6.21Aa	32.32±4.23Aa
W100~W150	739±11ABab	862±21Aab	320±7ABbc	375±9ABab	31.09±5.32Aa	39.40±3.56Aa	22.97±3.49Aa	33.97±5.65Aa
W50~W100	728±18ABb	800±19Bc	315±8Bbc	360±7Bc	26.57±3.17Aa	38.73±4.49Aa	19.34±2.57Aa	30.99±3.23Aa

3　讨论与结论

目前国内外学者将间作系统内部的竞争分为地上与地下两部分，其中地上部分的竞争主要指光照的竞争。光是重要的生态因子，是植物光合作用的原初能量来源[26–27]，光质的优劣直接决定了作物产量及产量品质的好坏[28]。间作系统中，间作物冠层所截获的光合有效辐射直接决定着整个间作系统的生产力，高秆植物对低秆作物冠层光照的遮挡降低了作物的光合有效辐射截获量，进而导致作物产量下降[29–31]。目前，国外在研究桉树(*Eucalyptus torelliana* F.)与卷心菜(*Brassica oleracea* L.)间作时发现，桉树遮阴会导致卷心菜产量的下降[32]。国内在研究杏(*Armeniaca vulgaris* Lam.)麦间作时也发现，杏麦争光导致靠近杏树的冬小麦形成明显减产区，随着离杏树距离的增加，冬小麦产量相应提高，且在巷道中央存在明显增产区[33]。本试验得出，冬小麦的 LSP 和 LCP 在不同生育时期不同，灌浆期冬小麦生理活性达峰值，以后逐渐下降。枣麦间作系统内冬小麦的冠层光照分布呈一定规律性，在时间上，间作冬小麦整个生育时期冠层饱和光照时长排序依次是成熟期>分蘖期>拔节期>灌浆期>抽穗期>扬花期；空间上，间作物冬小麦整个生育时期冠层饱和光合有效辐射时空窗大小依次为 W150~W200 cm>E150~E200 cm>W100~W150 cm>E100~E150 cm>W50~W100 cm>E50~E100 cm。在一天的光照周期内，同一条样线上的冬小麦冠层饱和光照均呈“n”型曲线分布。枣麦间作系统中，枣树对冬小麦冠层光照的遮挡面积及遮挡时长与冬小麦生育时期以及冬小麦的种植位置有关，且枣树对光照的遮挡导致冬小麦冠层光合有效辐射截获量及产量的下降。两行枣树间，中间位置的冬小麦冠层光合有效辐射截获量及产量均显著高于两侧，西侧整体高于东侧。枣树遮阴使冬小麦光合物质生产受到抑制，不育小穗增加，穗粒重和千粒重显著降低，从而导致产量下降，这一结果与国内学者关于枣棉间作等[34–36]研究结果相类似。研究还发现，枣麦间作时，两行枣树中间的小麦减产程度不显著，但不存在增产区，这与前人关于杏麦间作研究时出现间作作物产量溢出结果不一致，可能由于间作环境不一致造成的，也有可能由枣麦之间与杏麦之间的竞争机制不一致造成，具体原因有待进一步研究。

本试验运用时空窗度量的新方法以及更加精细的时间与空间划分的方法来研究枣麦间作系统中冬小麦的冠层光分布及产量的关系，该方法精确度高，计算复杂且对数据的完整度要求高，通过划分冬小麦的生育期来探索巷道光照分布及间作作物产量变化规律能为枣麦间作系统的科学管理提供科学依

据。但是，本试验只研究了光照对产量的影响，而关于水、肥、温度等其他生态因子对产量的影响并没有考虑进去，具有一定的局限性，可在以后作进一步研究。

综合分析得出，枣麦间作系统中，冬小麦冠层光照强度及产量整体呈现出不同的时空分布特征且相较于单一种植均有一定程度的衰减，其衰减程度为冠层饱和有效辐射>产量>千粒重>有效穗数>穗粒数。枣树遮阴导致冬小麦有效穗数和单株穗粒数下降，进而导致产量下降，其遮阴程度的差异导致间作物冬小麦减产程度的差异，且间作巷道内中央光照质量优于两侧，西侧整体优于东侧。

参考文献 References

[1] Francis C A. Multiple Cropping Systems[M]. New York: Macmillan, 1986: 1–37

[2] Long L, Sun J H, Zhang F S, et al. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. Oecologia, 2006, 147(2): 280–290

[3] Zhang F S, Long L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. Plant and Soil, 2003, 248(1/2): 305–312

[4] 乔旭，赵奇，雷钧杰，等. 核桃–小麦间作对小麦生长发育及产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(4): 734–738
Qiao X, Zhao Q, Lei J J, et al. Study on growth, development and yield formation of wheat under walnut-wheat intercropping system[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(4): 734–738

[5] 刘敬强，瓦哈甫·哈力克，王冠生，等. 新疆特色林果业资源时空分异规律研究[J]. 干旱地区农业研究，2012，30(2): 230–236
Liu J Q, Halik W, Wang G S, et al. Study on temporal and spatial distribution rules of characteristic fruit industry resources in Xinjiang[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2012, 30(2): 230–236

[6] Jose S, Williams R, Zamora D. Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(2/3): 231–239

[7] 黄承建，赵思毅，王龙昌，等. 马铃薯/玉米套作对马铃薯品种光合特性及产量的影响[J]. 作物学报，2013，39(2): 330–342
Huang C J, Zhao S Y, Wang L C, et al. Effect of potato/maize intercropping on photosynthetic characteristics and yield in two potato varieties[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 330–342

[8] 杜成凤，李潮海，刘天学，等. 遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响[J]. 生态学报，2011，31(21): 6633–6640
Du C F, Li C H, Liu T X, et al. Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6633–6640

[9] Friday J B, Fownes J H. Competition for light between hedgerows and maize in an alley cropping system in Hawaii, USA[J]. Agroforestry Systems, 2002, 55(2): 125–137

[10] 王平，王天慧，周道玮，等. 植物地上竞争与地下竞争研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3489–3499
Wang P, Wang T H, Zhou D W, et al. A literature review on the above- and below-ground competition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3489–3499

[11] 胡廷积，杨永光，马元喜，等. 小麦生态与生产技术[M]. 郑州：河南科学技术出版社, 1986: 19–23
Hu T J, Yang Y G, Ma Y X, et al. Ecology and Production Technology of Wheat[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1986: 19–23

[12] 王庆成，王忠孝. 作物高产高效生理学研究进展[M]. 北京：科学出版社, 1994: 25–34
Wang Q C, Wang Z X. Progress of Study on Physiology of High Yielding and High Efficiency Crop[M]. Beijing: Science Press, 1994: 25–34

[13] 郭翠花，高志强，苗果园. 花后遮阴对小麦旗叶光合特性及籽粒产量和品质的影响[J]. 作物学报，2010，36(4): 673–679
Guo C H, Gao Z Q, Miao G Y. Effect of shading at post flowering on photosynthetic characteristics of flag leaf and response of grain yield and quality to shading in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(4): 673–679

[14] 王世伟. 干旱地区绿洲灌溉条件下轮台白杏丰产栽培研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学, 2013
Wang S W. Study on high-yield cultivation for *Armeniaca vulgaris* cv. Luntaibaixing under irrigation conditions in arid oasis[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013

[15] 冯津，李登科，刘素琪，等. 不同生境枣园节肢动物群落的动态[J]. 山西农业大学学报, 2005, 25(2): 146–149
Feng J, Li D K, Liu S Q, et al. Dynamics of arthropod community at the jujube yard in different habitats[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2005, 25(2): 146–149

[16] 李志欣，刘进余，刘春田，等. 枣粮间作复合种植对作物生态及产量的动态影响[J]. 河北农业大学学报，2002，25(4): 45–48
Li Z X, Liu J Y, Liu C T, et al. Development effect of compound plant on crop ecology and yield in grain-jujube intercropping[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002, 25(4): 45–48

[17] 谢英荷，洪坚平，金志南，等. 枣麦间作对土壤生态环境的影响[J]. 农村生态环境, 1996, 12(3): 27–30
Xie Y H, Hong J P, Jin Z N, et al. The effect of intercropping Chinese date with winter wheat on soil eco-environment[J]. Rural Eco-Environment, 1996, 12(3): 27–30

[18] 尹飞，毛任钊，傅伯杰，等. 枣粮间作生态系统土壤氮空间分布特性[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 325–331
Yin F, Mao R Z, Fu B J, et al. Spatial distribution of soil nitrogen in a jujube-crop intercropping ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 325–331

[19] 尹飞，毛任钊，傅伯杰，等. 枣粮间作养分利用与表观损失空间差异性[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2715–2721

Yin F, Mao R Z, Fu B J, et al. Horizontal variation of nutrient uptake and apparent loss in jujube/crop intercropping ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2715–2721
[20] 尹飞，王群，付国占，等．枣粮间作生态系统土壤磷的空间分布特性[J]．河南农业大学学报, 2009, 43(4): 441–444
Yin F, Wang Q, Fu G Z, et al. Spatial distribution characteristics of soil phosphorus in a jujube-crop intercropping ecosystem[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2009, 43(4): 441–444
[21] 傅兆麟．小麦超高产基因型产量因素、株型和冠层结构特征的研究[D]．北京：中国农业大学, 2001
Fu Z L. Characteristics of yield components, plant type and canopy structure of super-high-yielding wheat genotypes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001
[22] 何盛莲，吴政卿，方保停，等．冬小麦测产系数研究[J]．西南农业学报, 2013, 26(2): 475–480
He S L, Wu Z Q, Fang B T, et al. Study on coefficient of estimated yield of winter wheat[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(2): 475–480
[23] Thornley J H M. Mathematical Models in Plant Physiology[M]. London: Academic Press, 1976: 86–110
[24] Rabinouitch E I. Photosynthesis and related process[J]. Soil Science, 1951, 2(1): 831–1191
[25] 王清涛．轮台白杏间作巷道间作物冠层饱和光合有效辐射时空窗研究[D]．乌鲁木齐：新疆农业大学, 2013
Wang Q T. Study on spatio-temporal window of saturated PAR on the crop canopy in intercropping alley of *Armeniaca vulgaris* cv. Luntaibaixing[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013
[26] Walker D A. Automated measurement of leaf photosynthetic O_2 evolution as a function of photon flux density[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society London B, 1989, 323(1216): 313–326
[27] 冯汉青，管东东，焦青松，等．光照下菜豆叶片抗氰呼吸与光合作用关系的分析[J]．植物生态学报，2015，39(1): 104–109
Feng H Q, Guan D D, Jiao Q S, et al. Analysis of the relationship between cyanide-resistant respiration and photosynthesis under light in *Phaseolus vulgaris* leaves[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(1): 104–109
[28] 郑有飞，徐静馨，吴荣军，等．太阳辐射减弱条件下冬小麦光合作用和干物质生产的模拟[J]．生态学杂志，2012，31(3): 583–593
Zheng Y F, Xu J X, Wu R J, et al. Winter wheat photosynthesis and dry matter production under decreased solar irradiance: A simulation study[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(3): 583–593
[29] 赵英，张斌，王明珠．农林复合系统中物种间水肥光竞争机理分析与评价[J]．生态学报, 2006, 26(6): 1792–1801
Zhao Y, Zhang B, Wang M Z. Assessment of competition for water, fertilizer and light between components in the alley cropping system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1792–1801
[30] 任万军，杨文钰，徐精文，等．弱光对水稻籽粒生长及品质的影响[J]．作物学报, 2003, 29(5): 785–790
Ren W J, Yang W Y, Xu J W, et al. Effect of low light on grains growth and quality in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 785–790
[31] 史建国，崔海岩，赵斌，等．花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]．中国农业科学，2013，46(21): 4427–4434
Shi J G, Cui H Y, Zhao B, et al. Effect of light on yield and characteristics of grain-filling of summer maize from flowering to maturity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(21): 4427–4434
[32] Nissen T M, Midmore D J, Cabrera M L. Aboveground and belowground competition between intercropped cabbage and young Eucalyptus torelliana[J]. Agroforestry Systems, 1999, 46(1): 83–93
[33] 张建雄，张保军，陈耀锋，等．南疆杏麦复合系统条件下小麦灌浆期冠层的光特性[J]．西北农业学报，2010，19(1): 76–80
Zhang J X, Zhang B J, Chen Y F, et al. Study on the optical characteristics of wheat under apricot-wheat system in the south of Xinjiang[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(1): 76–80
[34] 宋锋惠，吴正保，史彦江．枣棉间作对棉花产量和光环境的影响[J]．新疆农业科学, 2011, 48(9): 1624–1628
Song F H, Wu Z B, Shi Y J. The effect of jujube-cotton intercropping system on the cotton yield and light environment[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(9): 1624–1628
[35] 杨永辉，吴普特，武继承，等．冬小麦光合特征及叶绿素含量对保水剂和氮肥的响应[J]．应用生态学报，2011，21(1): 79–85
Yang Y H, Wu P T, Wu J C, et al. Responses of winter wheat photosynthetic characteristics and chlorophyll content to water-retaining agent and N fertilizer[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 21(1): 79–85
[36] 张继祥，魏钦平，刘克长，等．枣麦间作系统中光能在作物群体内分布的数值模拟[J]．应用生态学报，2003，14(6): 945–948
Zhang J X, Wei Q P, Liu K C, et al. Digital modeling of light distribution within the crop canopy in jujube-wheat interplanting system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(6): 945–948